**一个多节点声纳系统中同步时钟机制**

**的可靠性评估和系统优化问题**

组号 02 姓名 周睿文 学号 518021911150

摘 要：在工程系统的设计问题中，系统的可靠性和使用寿命是极为重要的性能指标，一个能够长时间稳定运行的系统将大大减小工程所带来的风险和维护成本。本文以一个多节点声纳系统为例，运用蒙特卡罗模拟方法研究其同步时钟机制的可靠性及使用寿命，并通过大规模的试验得出该系统中工作节点数目在不同优化目标下的最优取值。试验结果表明，随着工作节点数目的增加，系统的可靠性和使用寿命均呈现先上升后缓慢下降的趋势。此外，我还研究了总线阻塞问题的一种解决方案，并从概率论的角度讨论了系统的可靠性和可用性。

关键词：蒙特卡罗模拟，系统可靠性，系统优化，同步时钟机制

**The Reliability Evaluation and Optimization Problem of A Multi-node Sonar System’s Synchronous Clock Mechanism**

**ABSTRACT:** When trying to design a system, its reliability and life are essential parameters, as a system which always act with high stability in a long run might significantly reduce the risk and cost of maintenance. In this work, I take a multi-node sonar system as example, study the reliability of its synchronous clock mechanism and conduct extensive experiments to obtain the optimal number of working nodes in the system under different optimization targets. The results show that, the system’s reliability and life both rise on the first stage and then decrease slowly. Furthermore, I also look into a possible solution to the bus fail problem and discuss the system’s reliability and availability from a probability perspective.

**Key words:** Monte-Carlo Simulation, System Reliability, System Optimization,

Synchronous Clock Mechanism

**1 引言**

在大规模的工程设计问题中，我们非常有必要考虑系统的可靠性和寿命。一个具备高可靠性和较长使用寿命的系统，将会在系统的建设完成后提供大量潜在的收益，包括但不限于减少系统发生错误的风险、避免系统频繁维护的成本等。因此，现实生活中的不少大型系统为了提高系统的可靠性和使用寿命都采取了许多针对性的措施，比较常见的思路主可以分为以下两种：

（1）优化系统的内部结构、减小系统运行时的损耗。在机械结构容易发生摩擦的位置施加润滑剂、土木工程中增加不受力的杆件都属于此类方法。这类方法不需要额外的成本，但往往需要特别巧妙而富有创造性的设计才能实现；

（2）加入冗余设计，提高系统的容错性。在多个相同部件协同工作的系统中，特别是在维修不便的情形下，工程中就常常采用部件数量大于最小需求数量的设计，以保障系统在一些部件失效的情况下仍能正常工作，直到损坏的部件过多。这类方法一定程度上会增加制造成本，但额外的投入往往能得到更大的收益。

　　在本文中，我将以一个多节点声纳系统为例，运用蒙特卡罗模拟方法研究冗余设计对其同步时钟机制的可靠性及使用寿命的影响，并给出相应的理论分析。

**2 符号和术语**

为方便读者理解本文的模型和内容，先将本文中用到的主要符号和术语列于表1中，部分临时、中间符号将在用到时再做定义。

**表1 本文中的符号和术语**

|  |  |
| --- | --- |
| **符 号** | **含 义** |
|  | 事件*X*的发生概率 |
|  | 事件*X*为真时取1，否则取0 |
|  | 元件*X*的期望寿命 |
|  | 元件发生故障，故障*X*发生的条件概率 |
|  | 在时刻*t*节点*i*中切换器A和B的性能状态 |
|  | 在时刻*t*节点*i*的性能状态 |
|  | 在*t*时刻声纳系统整体的性能状态 |
|  | 系统工作寿命，限定最大值为9 × 104 |
|  | 系统可靠性，系统工作寿命超过某一定值*w*的概率 |

**3 系统优化的物理及数学模型**[1]

3.1 多节点声纳系统同步时钟机制的物理模型

本文研究的是一种多节点声纳系统当中的同步时钟机制。如图1所示（见附录），该声纳系统共有*n*个独立节点构成。各节点内部均是物理同构的。各节点必须保持严格的时钟信号同步才能有效协同工作，使系统发挥作用。只要有*k* = 5个节点能在同步时钟下正常工作，系统整体就能正常运转。

所有节点经由时钟信号总线连接，由其中一个节点担当主节点，其时钟电路工作于主模式，切换器A的掷刀接合于触点2，切换器B接通。本地时钟源信号既被用作本节点内部其他电路的工作时钟，又被输出到时钟信号总线上；其余节点均担当从节点，内部电路中切换器A的掷刀接合于触点 1，切换器B处于断开状态。从节点不向总线输出信号，仅从总线获取时钟信号作为本节点内部其他电路的工作时钟。

节点可能发生故障。由于应用场合的特殊性，故障一旦发生就无法修复。若某节点处于主模式，当它内部的时钟信号检测电路发现总线时钟信号失效，或不同于本地时钟源信号，则会通知控制电路改变切换器A和B的连接，退出主模式转为从模式。若某节点处于从模式，当它内部的时钟信号检测电路发现总线时钟信号失效，则会通知控制电路进入戒备状态，最终将随机产生一个从节点转入主模式。

3.2 多节点声纳系统同步时钟机制的数学模型

我们将切换器A和切换器B视作不可靠元件，而将系统中的其余元件均视作不失效的可靠元件，这些元件的失效风险已被等效地折算计入不可靠元件的失效风险中。

切换器可视作一种多状态元件，且彼此特性统计独立。由各元件组成的节点是构成系统的部件，显然其性能表现也是多状态的。声纳系统整体可看作一个多状态系统。

3.2.1 切换器A和B的模型

切换器A可能出现的故障包含以下三类：掷刀无法与触点1脱离、掷刀无法与触点2脱离以及掷刀保持悬空，依次记为A1、A2和A3；切换器B可能出现的故障包含以下两类：掷刀无法与触点1脱离、掷刀保持悬空，依次记为B1和B2. A和B正常工作的状态分别记为A0和B0.

切换器A的使用寿命*T*A服从参数为的指数分布，概率密度函数为：

（1）

已知切换器A发生故障的前提下，每种故障的条件概率分别为：

（2）

（3）

（4）

由贝叶斯公式得到*t*时刻节点处于每种状态的概率为：

（5）

（6）

切换器B的使用寿命*T*B服从参数为的指数分布，概率密度函数为：

（7）

已知切换器B发生故障的前提下，每种故障的条件概率分别为：

（8）

（9）

同样可以得到*t*时刻节点处于每种状态的概率为：

（10）

（11）

本文中，为简化模型，对切换器的故障额外做出如下三点假设：

（1）不同元件是否发生故障在统计上相互独立；

（2）元件的故障状态在故障发生后不可改变；

（3）元件的故障不可修复。

3.2.2 节点的状态模型

根据3.2.1节的讨论和假设，系统中各个节点的工作状态实际上完全由其内部切换器的状态决定。具体来说，对*t*时刻的某一节点*i*，切换器A可能处于A0至A3之中的任一状态，切换器B可能处于B0到B2之中的任一状态，因此切换器的不同状态组合共有12种，而它们对应着6种不同的节点工作状态，如表2所示（详见附录）。

3.2.3 系统的状态模型

按照本文中的模型，系统的工作状态完全由其中各个节点的工作状态决定。定义：

（12）

其中

（13）

从整体性能的角度，根据系统中所有节点的工作状态，可将系统的状态归为4类，记为，分别为：

（1）系统确定不能有效工作的状态

（2）系统确定能有效工作的状态

（3）系统以一定概率有效工作的状态

（4）系统以一定概率不能有效工作的状态

系统工作状态与其中各个节点工作状态（即）的逻辑关系比较复杂，[1] 中已经给出了明确的讨论过程和结果，这里做一个简要的重述：

（1）若满足式（14）包含的四个条件至少其中之一，则系统处于；

（14）

（2）若满足，并且式（15）中的条件至少有一个成立，则系统处于；

（15）

（3）若满足式（16）中的全部三个条件，则系统或者处于，或者处于.

（16）

其中处于的概率为，处于的概率为.

3.2.4 系统优化问题的形式化

本文研究的是系统可靠性和寿命的优化问题。按照可靠性的概率定义，最大化系统可靠性的问题可以从数学上表述为：

（14）

类似地，最大化系统寿命的问题可以表述为：

（15）

**4 蒙特卡罗模拟方法及其在案例中的应用**

4.1 蒙特卡罗模拟方法简介

蒙特卡罗模拟方法，也称蒙特卡罗实验，是一类通过重复随机采样获得数值结果的计算方法。该方法常被用于求解数学及物理上具有概率意义的问题，在通过理论分析寻求解析解和数值解非常困难的情况下具备很高的应用价值[2]。

蒙特卡罗模拟方法常在较为复杂的最优化、求定积分等问题中应用，通过将最优化转化为期望（均值）最大化、积分转化为面积等手段，通过独立随机的大规模采样，得到待求量的样本均值，作为数值上的结果。

蒙特卡罗模拟方法以概率论中的大数定理作为其数学理论基础：从大量随机试验中得到的样本均值应当与待求量的期望非常接近，并且随着样本容量趋向于无穷大，样本均值和期望的残差将趋向于零[3]。

4.2 蒙特卡罗模拟方法在案例中的应用

根据第3部分的数学模型，本案例研究的两个优化问题已经具备了概率视角下的意义，可以通过图2所示的方式进行随机采样、取样本均值作为指标的估计值。



**图2 蒙特卡罗方法在本案例中的算法流程**

给定样本容量*N*，对5 ~ 20之间的每一个数目，根据给定的元件参数，随机生成*N*个包含*n*个节点的系统样本（即其中每个节点的切换器A和B发生故障的时间及故障类型）。在仿真程序（详见附录simulate.m）中，上述信息被存储在名为event\_A和event\_B的两个*N* × *n* × 4的三维矩阵中，其中前两维下标为的元素表示第*i*个样本系统的切换器*j*的损坏信息。

对第*i*个样本系统，取出event\_A和event\_B第一维下标为*i*的切片，将上述两个矩阵合成为一个事件队列，并对该队列按照其中事件的时间顺序进行重排序。随后从前向后进行遍历该事件队列（即采用时间步长可变的方法），依次在每个故障发生后检查系统的状态，直至系统失效或超过最大寿命，得到该样本的寿命*Ti* 为造成失效的故障发生的时间. 需要指出的是，对满足或状态条件的系统，这里采取了生成随机数、判断是否大于阈值的方式来确定系统是否失效。在对所有样本进行模拟后：

（1）取这些样本的平均寿命，根据大数定理即可得到包含*n*个节点的系统寿命期望值的无偏估计；

（2）基于所有样本的寿命信息，可以计算出系统寿命大于给定*w*的频率，根据大数定理即可得到系统在*w*时刻可靠性的估计值.

**5 试验结果及讨论分析**

5.1 系统可靠性及平均寿命的数值试验结果

选取样本容量*N* = 105，运行程序得到的结果如表3所示，最优化问题的结果为：

（1）系统的节点数目为15时，系统的可靠性最高，为90.98%；

（2）系统的节点数目为18时，系统的平均寿命最长，为68357小时。

**表3 基本问题的数值试验结果**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **节点数目** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| **系统寿命（h）** | 9624 | 19166 | 28555 | 36870 | 44478 | 50947 | 55888 | 59987 |
| **可靠性（%）** | 7.63 | 23.61 | 42.55 | 58.63 | 71.57 | 80.31 | 85.68 | 88.78 |
| **节点数目** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
| **系统寿命（h）** | 63026 | 65377 | 66849 | 67717 | 68254 | 68357 | 68036 | 67758 |
| **可靠性（%）** | 90.30 | 90.89 | 90.98 | 90.61 | 90.18 | 89.57 | 88.79 | 88.20 |

5.2 试验结果分析

试验结果表明，设定不同的优化目标，尽管从直观上看二者非常相近，但仍然会在结果上带来比较显著的差异：在系统节点数目为15时，其平均寿命为66849小时；在系统节点数目为18时，其可靠性为89.57%，与最优方案的效果均有一定差距。

从表3中可以看出，不论是可靠性或是平均寿命，随着系统中节点数目的增加，指标均呈现先快速上升，随后上升减缓、最后缓慢下降的变化趋势，这说明在该多节点系统中，冗余的节点并非越多越好，节点数目过多将增加系统在较短时间内发生总线阻塞现象的概率，从而削弱系统的可靠性、减短系统的寿命。

在*N* = 105的试验之外，我还进行了*N* = 104情形的对比试验。按照本案例规定的*N* = 105的条件，每次运行程序得出的结果基本一致；而当样本数量减小为规定的十分之一时，多次运行程序得到的结果变得非常不稳定，不论是可靠性还是系统寿命最优化对应的节点数目都会在*N* = 105的结果附近发生波动。具体地说，样本数量减少后，程序给出的对应于系统可靠性最大化的节点数目经常为14，而对应于系统寿命最大化的节点数目经常为17.

**6 拓展研究：系统结构优化方案及可用性数值分析**

6.1 基本系统的可用性数值分析[1]

根据第3部分的系统模型，这一节将从概率论的角度，通过穷举系统中各节点状态的所有可能组合，给出理论上求取系统在*w*时刻可用性数值解的方法。

3.2.2节已经对节点工作状态与切换器工作状态之间的关系进行了详尽的说明，此处不再重复。对具有*n*个节点的声纳时钟系统，每个节点在的时刻均可能处于N0至N5的6种状态之一。根据概率论中的乘法和加法公式，可以得到如下结论：

（16）

其中表示对每个，成立，表示*w*时刻节点处于*Ni*状态的概率。等式右侧系数通过组合数的阶乘相消容易得到，此处不做过多推导。

根据式，枚举的每一种可能情形，以该情形下系统整体正常工作的概率作为权重，对加权求和，即可得到*n*节点系统在*w*时刻的可靠性数值：

（17）

按照本节描述的方法，通过计算得出了系统节点数目为*n* = 5 ~ 20时*w* = 2.5×104小时的可用性，并与通过蒙特卡罗模拟方法得出的系统可靠性进行了对比，结果如表4所示：

**表4 可用性理论数值和可靠性试验结果的对比分析**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **节点数目** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| **可用性（%）** | 9.05 | 25.74 | 44.37 | 60.67 | 72.94 | 81.23 | 86.36 | 89.27 |
| **可靠性（%）** | 7.63 | 23.61 | 42.55 | 58.63 | 71.57 | 80.31 | 85.68 | 88.78 |
| **节点数目** | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
| **可用性（%）** | 90.72 | 91.27 | 91.30 | 91.03 | 90.58 | 90.04 | 89.45 | 88.83 |
| **可靠性（%）** | 90.30 | 90.89 | 90.98 | 90.61 | 90.18 | 89.57 | 88.79 | 88.20 |

从表4中可以发现，系统的可用性总是稍大于系统的可靠性，这主要与模型当中系统可能先失效后恢复功能的漏洞有关：在可靠性的计算中，本文将系统第一次失效的时间作为系统的寿命进行统计；而在可用性的数值计算中，式（16）只关注*w*时刻系统处于不同工作状态的节点数目，而忽略了达到该状态之前系统可能已经失效的情况。

值得指出的是，系统先失效后恢复功能在直观上是极小概率的事件，因此可用性与可靠性差异并不显著，在实际应用中也可以将可用性作为可靠性的数值近似。

6.2 系统优化方案及可用性数值分析

在原有系统的数值试验中，我对所有未达到最大寿命的系统进行了统计分析，发现无论节点数目多少，绝大多数系统提前损坏都是总线阻塞造成的（比例均高达95%以上）。因此我推测：对切换器B做冗余设计有利于避免B1故障的发生，减小节点阻塞总线的概率，从而优化系统可靠性和寿命。

现在对节点结构做如下改动：在切换器B到时钟总线的连线上串联接入一个相同的切换器B’，它和组合控制电路的连接方式与B完全一致。将B和B’视为一个整体，则原有系统在切换器B处的逻辑发生了改变，如表5所示：

**表5 两个切换器B串联的逻辑模型**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 切换器B的故障状态 | 切换器B’的故障状态 | B和B’的整体状态 |
| B0 | B0 | 完美工作 |
| B1 | 正常工作 |
| B2 | 相当于原有系统B2 |
| B1 | B0 | 正常工作 |
| B1 | 相当于原有系统B1 |
| B2 | 相当于原有系统B2 |
| B2 | B0 | 相当于原有系统B2 |
| B1 | 相当于原有系统B2 |
| B2 | 相当于原有系统B2 |

从表5中可以看出，发生故障B1的概率改变为原有系统对应概率的二次方（约0.1）。进行与第5部分相同的数值试验，将系统中最大节点数目改为30得出的结果如图3所示。



**图3 串联切换器B后系统的数值试验结果 图4 串联切换器B对总线阻塞问题的影响**

从图3可以看出，系统的可靠性和寿命在节点较多时的下降变得不明显，且二者相比原有系统都有显著的改善。可靠性数值在节点数目达到15后趋于平稳，而系统的寿命在节点数目达到28后略微下降（但节点数目大于20的情况下始终非常接近9×104小时）。

此外，如图4所示，对因总线阻塞而失效的系统进行统计可以发现：

（1）串联两个切换器B还使得失效系统中原因为总线阻塞的占比显著降低；

（2）在规定的最大寿命之前失效的样本数量也大幅度减少。

因此，可以认为：引入额外串联切换器B的改进后，系统总线阻塞的问题得到了缓解，几乎总是能达到其使用寿命的上限。

另一方面，考虑到增设切换器B并非完全不消耗成本，且最优方案附近的节点数目取值也能达到与最优方案相差无几的效果，在实际的工程应用中，改进系统的节点数目可以适当取少一些，以达到最低的投入产出比。

**7 结论**

在本文中，我研究了一个多节点声纳系统同步时钟机制的可靠性和寿命优化问题。我将该系统建模为一个连接绝对有效、节点可能失效的网络，通过逻辑分析得出了系统的工作状态与其中的节点状态和元件状态之间的关系，将系统优化转化为均值和概率的最大化问题。利用蒙特卡洛模拟方法，基于大样本容量（*N* = 105）的数值仿真试验，我得出了系统可靠性和平均寿命随节点数目的变化规律，同时得出了优化问题的最佳解决方案：

（1）系统的节点数目为15时，系统的可靠性达到最高；

（2）系统的节点数目为18时，系统的平均寿命达到最长。

此外，从概率论的角度出发，我通过枚举法从理论上分析了系统的可用性，并与数值试验得出的可靠性进行了对比分析。基于系统主要因总线阻塞损坏的观察结果，我也针对性地给出了一种通过串联切换器B减小致命故障发生概率的系统结构优化方案，分析了优化后系统的可用性理论数值，并在试验中验证了该方案对减少总线阻塞、改善系统可靠性和寿命有着显著的作用。

**8 致谢**

在本次标定问题的研究中，非常荣幸地得到了老师和同学的帮助，我对此表示衷心的感谢：袁焱和李安琪两位老师在授课过程中就问题的研究思路、程序的设计思路以及论文的写作技巧提供了大量富有指导性的观点和建议。在与2018级丁立同学交流的过程中，我们因结论不一致而引发的讨论引导我发现了编写程序时的失误，推动了我工作的顺利进展。

**9 参考文献**

[1] 上海交通大学电子工程系. 工程问题建模与仿真课程讲义[EB/OL]. ftp://202.120.39.248.

[2] Wikipedia. Monte Carlo method[Z/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Monte\_Carlo\_method.

[3] Wikipedia. Law of large numbers[Z/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Law\_of\_large\_numbers.

**附　　录**

**代码清单**

main.m: 蒙特卡洛模拟方法主程序

clear; tic;

initialize; % Initialize all parameters.

for n = 5 : n\_max

simulate; % Simulate the case with n nodes in system.

% Compute the average life and reliability of N samples.

mean\_life(n) = mean(Life);

reliability(n) = sum(Life > 2.5e4) / n\_samples;

% Print some information about current simulation.

fprintf('\nCurrent system has %d nodes\n', n);

fprintf('The mean life is: %.2f h\n', mean\_life(n));

fprintf('The reliability is: %.2f %%\n', reliability(n) \* 100);

end

% Find and print the best solution to reliability and system life.

[best\_reli, best\_1] = max(reliability);

[best\_life, best\_2] = max(mean\_life);

fprintf('\nThe best solution to reliability contains %d nodes\n', best\_1);

fprintf('The best reliability is: %.2f %%\n', best\_reli \* 100);

fprintf('\nThe best solution to system life contains %d nodes\n', best\_2);

fprintf('The best system life is: %.2f h\n', best\_life);

fprintf('\nThe execution time is: %.2f s\n', toc);

% Evaluate system availability A(w) and visualize the statistics.

eval\_avail;

plot\_figures;

initialize.m: 参数初始化，设置节点状态矩阵

mu\_A = 2.72e4; % Average life of switch A

mu\_B = 3.32e5; % Average life of switch B

n\_max = 20; % Maximum number of nodes

n\_samples = 1e5; % Sample size

Life = zeros(1, n\_samples); % To record the life of each sample

max\_life = 9e4; % Maximum life of system

% To record the average life and availability of systems with different nodes.

mean\_life = zeros(1, n\_max);

reliability = zeros(1, n\_max);

% The status of node corresponding to the status of switch A and B.

combo = [0, 3, 1; 1, 5, 1; 2, 3, 4; 4, 4, 4];

simulate.m: 对每一个节点数目，均进行一次样本容量为*N*的模拟，求出可靠性和平均寿命

status\_A = rand(n\_samples, n);

status\_B = (rand(n\_samples, n) > 0.33) + 1;

state\_nodes = zeros(n\_samples, n);

% Generate fault time and type for each switch.

status\_A(status\_A > 0.6) = 3;

status\_A(status\_A <= 0.3) = 1;

status\_A(status < 1) = 2;

broken\_A = exprnd(mu\_A, n\_samples, n);

broken\_B = exprnd(mu\_B, n\_samples, n);

A = zeros(n\_samples, n);

B = zeros(n\_samples, n);

for s = 1 : n\_samples

% To experiment on the case with an extra switch B in series,

% Just revise the codes above, and the following should remain unchanged.

% The first column states the node ID and the last column differs A and B.

event\_A = [1 : n; broken\_A(s, :); status\_A(s, :); zeros(1, n)]';

event\_B = [1 : n; broken\_B(s, :); status\_B(s, :); ones(1, n)]';

events\_queue = sortrows([event\_A; event\_B], 2);

for idx = 1 : 2 \* n

% Examine each fault in time order.

event = events\_queue(idx, :);

if event(2) > max\_life

Life(s) = max\_life;

break; % The sample’s life reaches 9e4.

end

if event(4)

B(s, event(1)) = event(3);

else

A(s, event(1)) = event(3);

end

% Obtain the status of node according to the status of its switches.

state\_nodes(s,event(1)) = combo(A(s,event(1)) + 1, B(s,event(1)) + 1);

state\_sys = check\_sys(state\_nodes(s, :));

if ~state\_sys

Life(s) = event(2);

break; % The bus fail information can be collected here.

end

end

end

check\_sys.m: 根据当前各个节点的状态 (N0 to N5)，得出系统的工作状态

function state = check\_sys(state\_nodes)

% According to the status of nodes,

% Obtain the status of the whole system.

% Compute the number of nodes in different status.

PF = sum(state\_nodes == 0);

SO = sum(state\_nodes == 1);

DM = sum(state\_nodes == 2);

MO = sum(state\_nodes == 3);

DN = sum(state\_nodes == 4);

FB = sum(state\_nodes == 5);

% The case of G\_sys1.

if (FB >= 1) || (MO >= 2) || (PF + MO + DM == 0) || …

(PF + SO + ((MO + DM) > 0) < 5)

state = 0;

return;

end

% The case of G\_sys2.

if ((MO == 1 && PF + SO >= 4) || (MO == 0 && PF >= 1 && ...

PF + SO >= 5) || (MO == 0 && PF == 0 && DM >= 1 && SO >= 4))

state = 1;

return;

end

% The case of G\_sys3 and G\_sys4.

if rand() <= DM / (DM + PF)

state = 1;

else

state = 0;

end

end

plot\_figure.m: 根据试验结果及可用性的理论分析，进行数据的可视化

% Visualize the average life and reliability of systems with different nodes.

% The figure is plotted with double y axis.

hold on; set(gca, 'fontsize', 16);

yyaxis left; ylabel('Average Life of System (Hours)', 'fontsize', 20);

plot(5 : n\_max, mean\_life(5 : n\_max), '.-', 'markersize', 20, 'Linewidth', 2);

yyaxis right; ylabel('Reliability', 'fontsize', 20);

plot(5:n\_max, reliability(5 : n\_max), 'x-', 'markersize', 12, 'Linewidth', 2);

hold off; grid on; box on;

legend('System Life', 'Reliability', 'location', 'southeast');

xlabel('The Number of Nodes', 'fontsize', 20);

title('Reliability and System Life Analysis', 'fontsize', 28);

% Compare and analysis the reliability and availability.

figure(); hold on;

plot(5 : n\_max, reliability(5:n\_max), '+-', 'markersize', 12, 'Linewidth', 2);

plot(5 : n\_max, available(5:n\_max), 'x--', 'markersize', 12, 'Linewidth', 2);

hold off; grid on; box on;

legend('Reliability', 'Availability', 'location', 'southeast');

set(gca, 'fontsize', 16); ylim([0 1.005]);

xlabel('The Number of Nodes', 'fontsize', 20);

ylabel('Reliability/Availability', 'fontsize', 20);

title('Reliability and Availability Analysis at 25,000 Hours', 'fontsize', 28);

eval\_avail.m: 进行系统可用性的数值分析

% Initialize parameters.

w = 2.5e4;

p\_A0 = exp(-w / mu\_A);

p\_B0 = exp(-w / mu\_B);

p\_A1 = 0.3 \* (1 - p\_A0);

p\_A2 = 0.3 \* (1 - p\_A0);

p\_A3 = 0.4 \* (1 - p\_A0);

p\_B1 = 0.33 \* (1 - p\_B0);

p\_B2 = 0.67 \* (1 - p\_B0);

% The probability of node status at timestamp w.

p\_PF = p\_A0 \* p\_B0;

p\_MO = (p\_A0 + p\_A2) \* p\_B1;

p\_SO = p\_A0 \* p\_B2 + p\_A1 \* p\_B0 + p\_A1 \* p\_B2;

p\_FB = p\_A1 \* p\_B1;

p\_DM = p\_A2 \* p\_B0;

p\_DN = p\_A2 \* p\_B2 + p\_A3;

% To record the availability A(w) for systems with different number of nodes.

available = zeros(1, n\_max);

% Simulate for each n.

for n = 5 : n\_max

nodes = zeros(1, n);

for PF = 0 : n

for MO = 0 : (n - PF)

for SO = 0 : (n - PF - MO)

for FB = 0 : (n - PF - MO - SO)

for DM = 0 : (n - PF - MO - SO - FB)

DN = n - PF - MO - SO - FB - DM;

% Case of G\_sys1.

if (FB >= 1) || (MO >= 2) || (PF + MO + DM == 0) …

|| (PF + SO + sum(MO + DM > 0) < 5)

continue;

end

% Case of G\_sys2.

if (MO == 1 && PF + SO >= 4) || (MO == 0 && …

PF >= 1 && PF + SO >= 5) || (MO == 0 && …

PF == 0 && DM >= 1 && SO >= 4)

available(n) = available(n) + prod(1 : n) \* …

p\_PF^(PF) \* p\_MO^(MO) \* p\_SO^(SO) \* p\_FB^(FB) …

\* p\_DM^(DM) \* p\_DN^(DN) / prod(1 : PF) / …

/ prod(1 : MO) / prod(1 : SO) / prod(1 : FB) …

/ prod(1 : DM) / prod(1 : DN) / prod(1 : PF); else

% Case of G\_sys3 and G\_sys4.

available(n) = available(n) + prod(1 : n) \* …

p\_PF^(PF) \* p\_MO^(MO) \* p\_SO^(SO) \* p\_FB^(FB) …

\* p\_DM^(DM) \* p\_DN^(DN) / prod(1 : PF) / …

/ prod(1 : MO) / prod(1 : SO) / prod(1 : FB) …

/ prod(1 : DM) / prod(1 : DN) / prod(1 : PF) …

\* DM / (DM + PF);

end

end

end

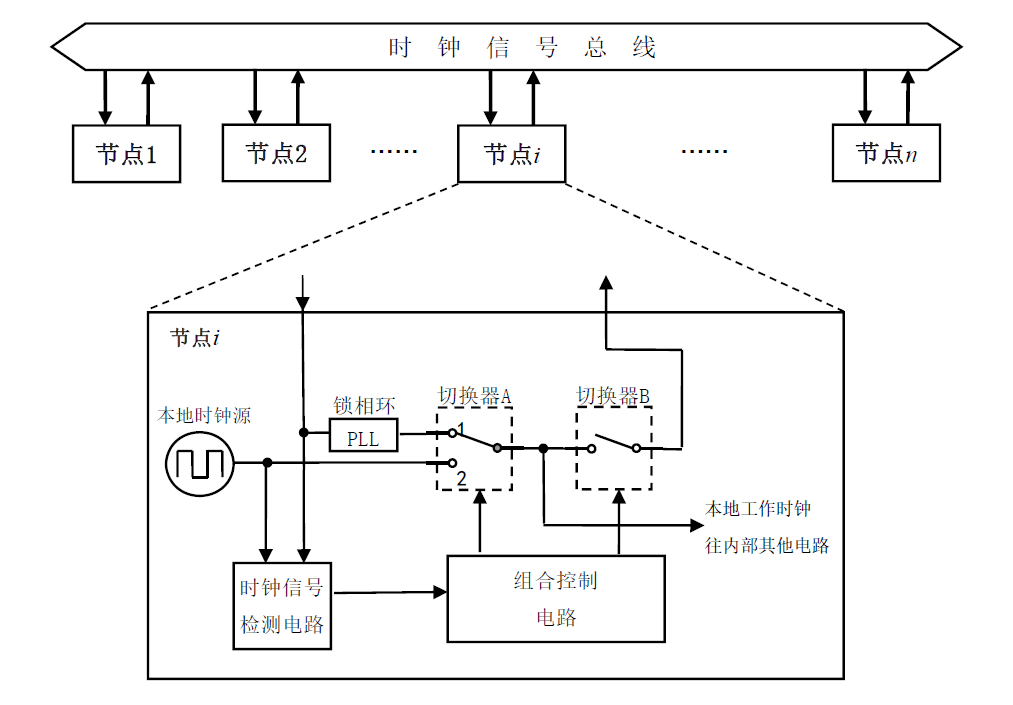
end

end

end

end

**正文中引用但未列出的所有大型图表**



**图1 多节点声纳系统同步时钟机制的物理模型示意图**[1]

**表2 切换器——节点状态关系**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 切换器A | 切换器B | 节点功能状态 | 符号表示 |
| A0 | B0 | 性能完好 | N0 |
| B1 | 只能作为主节点，否则就会阻塞总线 | N3 |
| B2 | 只能作为从节点 | N1 |
| A1 | B0 | 只能作为从节点 | N1 |
| B1 | 节点总是阻塞总线 | N5 |
| B2 | 只能作为从节点 | N1 |
| A2 | B0 | 只能作为主节点或不阻塞总线的失效节点 | N2 |
| B1 | 只能作为主节点，否则就会阻塞总线 | N3 |
| B2 | 只能作为不阻塞总线的失效节点 | N4 |
| A3 | B0 | 只能作为不阻塞总线的失效节点 | N4 |
| B1 | 只能作为不阻塞总线的失效节点 | N4 |
| B2 | 只能作为不阻塞总线的失效节点 | N4 |